

Indice:

Introduzione.....	3
Scopo e funzioni di un trasformatore di corrente.....	5
Il trasformatore di corrente a doppio stadio.....	9
Comparativa delle prestazioni.....	16
Effetto della mutua induttanza esterna.....	21
Alcune caratteristiche di progettazione.....	22
Collaudo del trasformatore di corrente a doppio stadio.....	23
Costruzione con tre nuclei toroidali.....	29
Vantaggi del trasformatore a doppio stadio.....	35
Relazioni matematiche.....	37
Impiego del trasformatore a doppio stadio nella misurazione in AT.....	45
Conclusioni.....	53
Bibliografia.....	55

INTRODUZIONE

Questo elaborato presenta una discussione sui trasformatori di corrente usati per misurazioni e controlli di apparecchiature, con uno speciale riferimento al livello di precisione che può essere raggiunto riguardante l'errore d'angolo di fase e di rapporto. Viene descritto un nuovo tipo di trasformatore di corrente in cui è possibile garantire una molto più elevata accuratezza nella misura con un determinato apporto di ferro e rame nel trasformatore.

In questo nuovo dispositivo, la trasformazione viene effettuata in "due stadi": il primo rende come al solito una corrente secondaria che è approssimativamente corretta in modulo e fase. Il secondo, rende una corrente ausiliaria correttiva che, quando combinata con la prima corrente secondaria, fornisce una corrente risultante che molto si avvicina alla corrente secondaria che potrebbe essere fornita da un trasformatore di corrente ideale non avente errori.

Le due correnti possono essere facilmente combinate per avere due avvolgimenti nel dispositivo, uno per il principale e l'altro per la corrente ausiliaria secondaria..

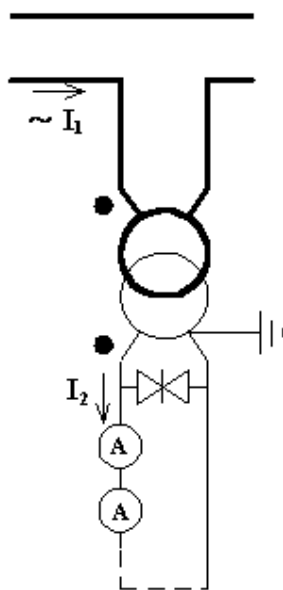
La teoria matematica dei trasformatori di corrente a doppio stadio è sviluppata e applicata.

In seguito verranno date delle curve sperimentali per confrontare le prestazioni del nuovo trasformatore di corrente con quelle del trasformatore di corrente "normale" che troviamo ad esempio negli impianti.

L'effetto della mutua induttanza tra i circuiti secondari esterni viene discussa e vengono dati alcuni degli speciali vantaggi del nuovo trasformatore di corrente.

Verranno descritti alcuni metodi di costruzione e procedimenti per testare questo nuovo trasformatore. Inoltre verrà presa in considerazione una particolare applicazione innovativa del trasformatore di corrente a doppio stadio per le misurazioni in alta tensione. Il sistema è basato su un "prototipo" trasformatore di corrente con un circuito elettronico che esegue una conversione A/D. Il sistema usa una fibra ottica per trasmettere i dati a una stazione di terra e una fibra ottica particolare con l'impiego di un laser per fornire energia ai circuiti elettronici a quello che possiamo chiamare modulo remoto in alta tensione. L'incertezza sulla misurazione del rapporto di corrente è valutata meno del $100 \cdot 10^{-6}$ sia per l'errore di rapporto che d'angolo

SCOPO E FUNZIONI DI UN TRASFORMATORE DI CORRENTE



In questa discussione ci occuperemo dei trasformatori di corrente per scopi di misura. Essi devono garantire una corretta misura della grandezza controllata (nel nostro caso la corrente) per un intervallo di valori che supera di poco il valore nominale. Inoltre devono impedire che gli strumenti alimentati possano essere danneggiati da valori eccessivi di corrente. Ad esempio un trasformatore di corrente fornisce un valore al secondario direttamente proporzionale alla corrente primaria nel campo di correnti che va dal 5% al 120% della corrente nominale. Per valori superiori satura rapidamente. In tal modo eventuali correnti primarie dovute ad un cortocircuito, non danneggiano gli strumenti collegati al secondario.

I trasformatori di corrente (comunemente chiamati **TA**) sono trasformatori aventi numero di spire al primario N_1 minore del numero di spire al secondario N_2 . Per questi trasformatori il rapporto di trasformazione è definito come rapporto tra la corrente al primario e corrente al secondario. Affinché il rapporto di trasformazione effettivo **K** sia molto vicino al rapporto di trasformazione nominale **K_n** è necessario che sia trascurabile la corrente a vuoto rispetto alla corrente di reazione primaria e questo accade solo se il trasformatore funziona in condizioni prossime al funzionamento in cortocircuito, in tali condizioni è infatti:

$$K_n \cong K = \frac{I_1}{I_2} \cong \frac{I_1'}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (1)$$

Per rendere trascurabile la corrente a vuoto rispetto alla corrente di reazione bisogna tenere molto bassa l'induzione nel nucleo ed usare lamierini a bassissima perdita specifica, ovvero bisogna tenere una sezione del nucleo molto più grande di quella di un equivalente trasformatore industriale. E' evidente che il primario andrà inserito in serie alla linea della quale si intende misurare la corrente. Volendo si può limitare il primario ad un'unica spira, in questo caso non è necessario interrompere la linea sulla quale si deve fare la misura in quanto il filo stesso della linea costituisce l'unica spira primaria.

Si definisce **errore di rapporto percentuale**:

$$\eta\% = \frac{K_n \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 \quad (2)$$

dove ($K_n \cdot I_2$) è la corrente al primario calcolata attraverso il prodotto della corrente secondaria per il rapporto di trasformazione nominale e I_1 è la effettiva corrente primaria. Se K è l'effettivo rapporto di trasformazione sarà anche:

$$\eta\% = \frac{K_n \cdot I_2 - K \cdot I_2}{K \cdot I_2} \cdot 100 = \frac{K_n - K}{K} \cdot 100 \quad (3)$$

Si definisce **errore d'angolo** l'angolo di sfasamento tra $\overline{I_1}$ e $-\overline{I_2}$, considerandolo positivo se la seconda è in anticipo sulla prima e negativo viceversa. Questo errore non ha alcun effetto sulle misure della sola corrente, influenza invece le misure di potenza (o d'energia) per le quali è necessario che lo sfasamento esistente tra la corrente $\overline{I_1}$ e la tensione di linea sia lo stesso che si ha tra la corrente $-\overline{I_2}$ e la tensione di linea (è noto infatti come la potenza sia determinata dal $\cos\phi$, oltre che dai valori efficaci di tensione e corrente).

I **dati di targa** più significativi del trasformatore di corrente sono:

a) **prestazione nominale S_n [VA]**, è la massima potenza apparente che il trasformatore di corrente può erogare sugli equipaggi amperometrici (tutti in serie) da esso alimentati senza che il trasformatore di corrente superi i limiti di errore

caratterizzati dalla sua classe di appartenenza (la prestazione è riferita al **fattore di potenza nominale** che vale convenzionalmente **0,8r**);

b) **corrente nominale primaria I_{1n} [A], corrente nominale secondaria I_{2n} [A]** uniformata a **5 [A], 2 [A], 1 [A]**.

c) **frequenza nominale [Hz]**;

d) rapporto nominale di trasformazione **$K_n = I_{1n} / I_{2n}$** ,

e) **classe di precisione**, che delimita gli errori d'angolo e di rapporto.

Mediante la prestazione e la corrente secondaria nominale è possibile determinare la **massima impedenza** che è possibile collegare al secondario del **trasformatore di corrente**, sarà infatti:

$$Z_{2MAX} = \frac{S_n}{I_{2n}^2} \quad [\Omega] \quad (4)$$

Come detto la prestazione è il carico che può essere applicato ai secondari senza che siano superati gli errori di rapporto e di fase. Per i TA si hanno in genere $S_r = (2,5; 5; 10; 15; 30)$ VA. Per i TA gli errori sono dati anche in funzione della effettiva corrente primaria rapportata al valore nominale I_r . I valori delle correnti nominali dei TA sono $I_r = (10; 20; 100; 500; 1.000; 5.000; 10.000)$ A. I valori normalizzati al secondario sono $(5; 2; 1)$ A. Il rapporto di trasformazione è il rapporto tra la primaria nominale e la secondaria nominale.

TA di MISURA								
	$(I/I_r) \cdot 100; S = (25..100)\% S_r, \cos \phi = 0,8 R$							
	5%	20%	100%	120%	5%	20%	100%	120%
Classe	h%				eI (centiradiani)			
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	5,4	2,7	1,8	1,8
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	2,7	1,35	0,9	0,9

Poiché i trasformatori di corrente lavorano in pratica in condizioni di cortocircuito occorre assolutamente evitare che i morsetti secondari rimangano aperti; a primario alimentato la tensione secondaria raggiunge valori elevati, che, oltre a danneggiare l'isolamento del secondario, possono costituire un notevole pericolo per gli operatori. Devono pertanto essere protetti da dispositivi che, in caso di sovratensione, chiudano i morsetti secondari in cortocircuito.

TRASFORMATORE A DOPPIO STADIO

Per fare in modo che una corretta corrente secondaria possa essere indotta, una certa componente della corrente primaria deve essere usata per produrre la necessaria magnetizzazione e per supplire alle perdite del nucleo.

Il nucleo fatto di materiale ferromagnetico si rende conto che questa componente della corrente primaria varia con (1) il carico secondario (2) la frequenza (3) il modulo della corrente secondaria.

Perché questa componente non varia proporzionalmente con la corrente secondaria, il rapporto tra le due correnti varia in base ai cambiamenti di ognuno dei tre fattori precedentemente elencati, sia uno per volta che insieme.

Inoltre la differenza di fase elettrica tra la corrente primaria e quella secondaria, che sarebbe esattamente 180 gradi in un trasformatore ideale, discosta dai 180 gradi di un piccolo angolo, “l’angolo di fase”, che varia con ognuna delle tre cause menzionate sopra. (Per questo basta cambiare i riferimenti sui morsetti e l’angolo diventa pari a zero gradi).

Per le operazioni di precisione nelle misurazioni elettriche, in particolare per wattmetri e contatori di energia elettrica, è necessario che il rapporto tra la corrente primaria e secondaria sia sempre costante e che lo scostamento dai 180 gradi di fase risulti essere trascurabile.

Questo dovrebbe essere vero per qualunque condizione di carico secondario, corrente primaria e frequenza.

Cambiamenti nel rapporto incidono nelle letture dello strumento per ogni fattore di potenza mentre l’angolo di fase causa errori maggiori se il fattore di potenza è basso. Per esempio usando un contatore di energia elettrica polifase per la misurazione della distribuzione dell’energia in un sistema trifase, una variazione dell’ 1 % del rapporto causa un errore dell’ 1% nella rilevazione, a prescindere dal fattore di potenza.

Quando il sistema e’ all’ 86.6 o 50 % del fattore di potenza, un angolo di fase di 20 minuti (Sono circa 0,33 gradi) causerà errori rispettivamente dello 0,3% e 1 % nella rilevazione delle misure dello strumento .

Mentre errori del genere sul rapporto di trasformazione e sulla fase sono conosciuti, i loro effetti sulla precisione degli strumenti ai quali sono connessi non sono sempre notati.

Al di là delle condizioni, di cui abbiamo già discusso, che influiscono sul rapporto e sull’angolo di fase di un comune trasformatore di corrente, vi è la questione per quanto riguarda la magnetizzazione del nucleo durante alcuni momenti di apertura e chiusura del circuito primario o aperture accidentali del secondario quando è sotto carico.

I trasformatori di tensione sono in grado di offrire una prestazione molto maggiore rispetto ai trasformatori di corrente, in particolare per quanto riguarda l’angolo di fase.

Il contatore di energia elettrica indotto è stato anche portato ad un alto grado di sviluppo, e le sue prestazioni su carichi non induttivi e induttivi sono facilmente controllabili attraverso l’utilizzo di tre aggiustamenti “standard” (basso carico, pieno carico, fase).

I trasformatori di corrente sono in ritardo nell'evoluzione rispetto agli altri due essenziali elementi per la misurazione. L'unico modo per ottenere un radicale miglioramento, con metodi di costruzione comunemente impiegati, è nell'usare ferro con avente delle qualità magnetiche molto superiori di quelle disponibili ora in commercio.

Lo scopo di questo testo è di esporre come la trasformazione di corrente per scopi di misurazione può essere portata ad un livello di precisione almeno pari a quello degli altri due componenti, mediante un dispositivo che abbiamo chiamato “**trasformatore di corrente a doppio stadio**”.

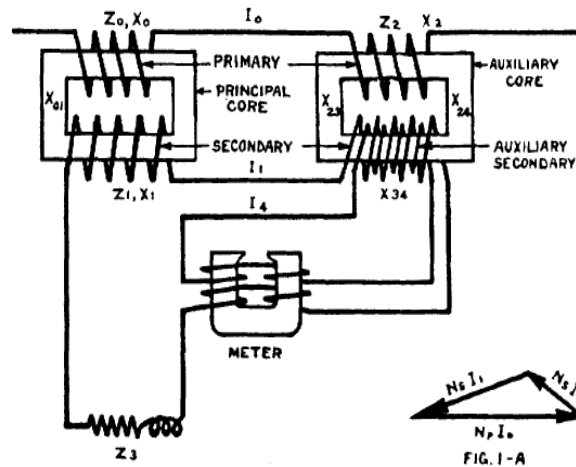


Fig. 1—ELEMENTARY DIAGRAM OF ELECTRIC AND MAGNETIC CIRCUITS OF TWO-STAGE CURRENT TRANSFORMER SHOWN AS TWO SEPARATE TRANSFORMERS

Il trasformatore di corrente a doppio stadio (esposto schematicamente in fig. 1) intrinsecamente e automaticamente effettua una correzione del rapporto di corrente e dell'angolo di fase tra le correnti primaria e secondaria per un alto livello di precisione entro vasti limiti di carico secondario.

Questo avviene secondo un processo che può essere chiamato “trasformazione multistadio” in cui un trasformatore (il primo a sinistra in fig. 1) viene usato per effettuare la trasformazione nel modo usuale, rendendo una corrente che è approssimativamente corretta sia in modulo che in fase.

La corrente primaria e questa corrente secondaria vengono fatte passare attraverso due avvolgimenti del secondo trasformatore di corrente in cui il rapporto tra le spire dell'avvolgimento secondario e quelle del primario è uguale al rapporto desiderato tra corrente primaria e quella secondaria.

Le due correnti inviate attraverso i rispettivi avvolgimenti in modo che i loro effetti magnetizzante sul nucleo (in ampere spire) tendano ad opporsi l'un l'altro.

(Questo esatto rapporto di spire è in contrasto con il fatto che nei trasformatori di corrente comuni costruiti attualmente, al fine di garantire all'incirca il rapporto desiderato, uno o più avvolgimenti del secondario devono essere omessi rispetto al numero che sarebbe necessario in un trasformatore ideale).

Il secondo trasformatore di corrente è provvisto di un altro avvolgimento chiamato secondario ausiliario, avente all'incirca lo stesso numero di spire dell'avvolgimento secondario principale.

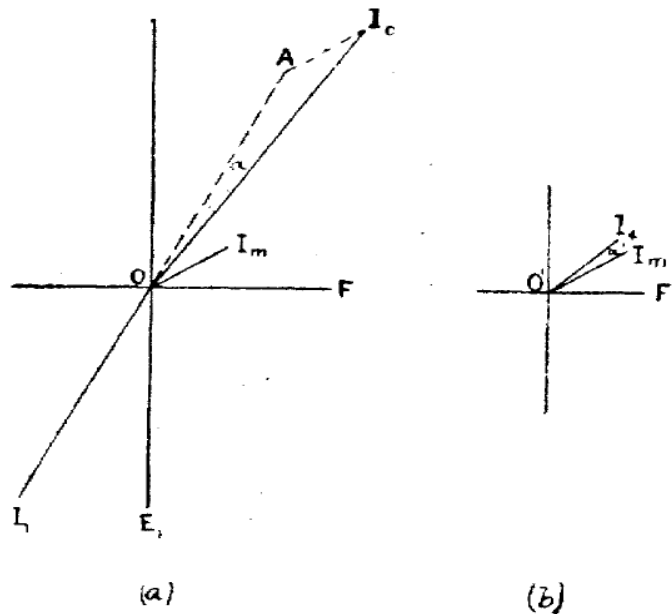
Sarà evidente che se il primo trasformatore sta operando in condizioni tali che la corrente secondaria sia esattamente corretta in modulo e fase, le ampere-spire dei due avvolgimenti del secondo trasformatore si annulleranno a vicenda in ogni momento e non si produrrà nessuna magnetizzazione nel nucleo del secondo trasformatore e conseguentemente non ci sarà nessuna corrente che cirolerà nell'avvolgimento secondario ausiliario.

Se, comunque come avviene di solito praticamente, la corrente secondaria prodotta dal primo trasformatore discosta dal valore desiderato in modulo e in angolo di fase, o in entrambi, questa corrente e la corrente primaria fluiscono in direzioni opposte attorno al nucleo del secondo trasformatore producendo una forza magnetizzante risultante che agisce su di esso.

Se l'ausiliario secondario viene ora connesso ad un circuito esterno, una corrente circolante tenderà a ridurre a zero il flusso nel nucleo ausiliario.

Sotto appropriate condizioni questa corrente ausiliaria secondaria si avvicina approssimativamente in modulo e fase alla corrente che deve essere vettorialmente sommata alla corrente principale secondaria per produrre una corrente come quella che sarebbe data da un trasformatore ideale di rapporto esatto e un angolo di fase pari a zero.

Le relazioni coinvolte possono essere viste dal diagramma vettoriale di figura 2:



In cui (a) è il diagramma semplificato del funzionamento di un normale trasformatore di corrente.

OF rappresenta la direzione del flusso nel nucleo, OE_1 quello della forza elettromotrice secondaria indotta.

Il loro modulo è irrilevante in questa trattazione.

Con il solito caso del circuito secondario avente resistenza e induttanza, la corrente secondaria OI_1 sarà in ritardo su OE_1 , e se la bobina secondaria è composta da una spira, OI_1 può anche rappresentare le ampere spire secondarie.

OA è disegnata di lunghezza uguale a OI_1 e a 180 gradi da essa e rappresenta la componente dell'ampere-spire primario che bilancia la forza magnetomotrice secondaria.

Per produrre il flusso e compensare le perdite del nucleo, una corrente di magnetizzazione I_m deve fluire attraverso la spira primaria (avvolgimento costituito da una sola spira), e I_m

Mostra il modulo e la direzione di questa corrente e la sua forza magnetomotrice (in ampere-spire).

Combinando OA e OI_m , otteniamo il vettore OI_0 che rappresenta la corrente primaria e le rispettive ampere-spire.

Si può vedere che finché OA è più corto rispetto a OI_0 , I_1 è più piccola del valore desiderato.

(in pratica questo è solitamente corretto, per ogni tipo di condizione, eliminando le spire secondarie. Ossia, tenendone un numero inferiore rispetto al numero richiesto da un trasformatore ideale.

Comunque, per tutti gli altri tipi di condizioni, la corrente I_m non cambia con la stessa proporzione delle altre correnti per mantenere il rapporto del valore desiderato)

Inoltre, siccome OA porge OI_0 dal punto di vista α , la corrente secondaria ha un errore di fase di questa quantità.

Se noi passiamo OI_0 e OI_1 attraverso un avvolgimento di una sola spira attorno a un altro nucleo in modo che i loro effetti magnetizzanti siano sostanzialmente in opposizione, e la loro forza magnetizzante risultante sarà proporzionale a OIm .

Questi due opposti avvolgimenti possono essere quindi considerati come l'equivalente ad un unico avvolgimento primario, attraversato dalla corrente I_m . Poi in un terzo avvolgimento attorno al nucleo (vedi fig. 2 b) la corrente I_4 sarà indotta.

E' evidente che se questa corrente viene sommata settorialmente a OA (fig. 2 a) la corrente risultante sarà molto più vicina a OI_0 in ampiezza e fase rispetto a OA .

La corrente dal secondario ausiliario può essere facilmente utilizzata per fornire un contatore di energia elettrica (o altri strumenti) con due identici avvolgimenti di corrente connessi rispettivamente al circuito principale e a quello secondario ausiliario come mostrato in figura 1 e 3.

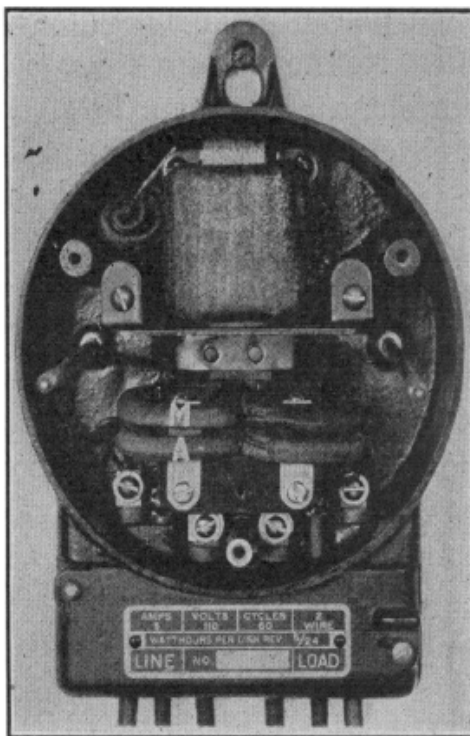


FIG. 3—MOTOR ELEMENT OF WATT-HOUR METER, SHOWING THE TWO CURRENT WINDINGS REQUIRED FOR USE WITH THE TWO-STAGE CURRENT TRANSFORMER

In tali condizioni le ampere spire totali negli avvolgimenti di ogni strumento connesse al sistema di trasformazione saranno per tutti gli scopi pratici esattamente uguali alle ampere spire derivate da un trasformatore ideale. Il trattamento matematico della rete elettrica e magnetica in questione viene dato in una successiva appendice di questo testo.

Invece dei due distinti trasformatori che avevamo descritto in figura 1 e' più conveniente usare un singolo avvolgimento primario e un singolo avvolgimento secondario che circondano entrambi i nuclei, con l'avvolgimento secondario ausiliario e poche spire dell'avvolgimento secondario ausiliario circondanti il solo nucleo ausiliario.

Questo metodo di costruzione produce un trasformatore a doppio stadio che e' fisicamente una singola unità compatta (vedere figura 4) che mostra come un trasformatore viene connesso a un contatore di energia elettrica.

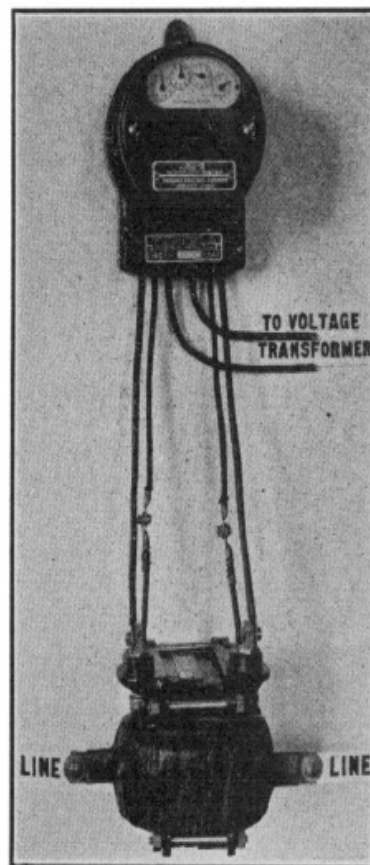


FIG. 4—TWO-STAGE CURRENT TRANSFORMER CONNECTED TO WATT-HOUR METER

Il metodo di collegamento del circuito elettrico e magnetico e' descritto schematicamente in figura 5 in cui i numeri 1,2,3 rappresentano rispettivamente l'avvolgimento primario, l'avvolgimento secondario principale e l'avvolgimento secondario ausiliario.

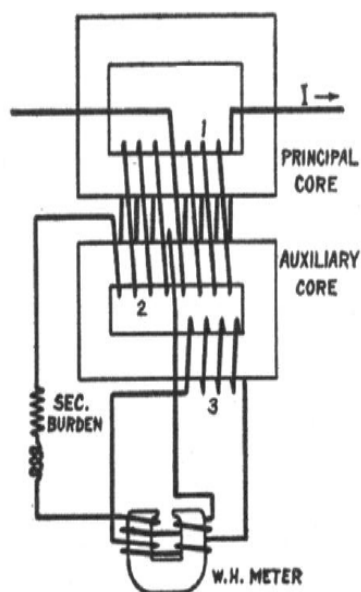


FIG. 5—ELECTRIC AND MAGNETIC CIRCUITS OF TWO-STAGE CURRENT TRANSFORMER MADE AS A STRUCTURAL UNIT

COMPARATIVA DELLE PRESTAZIONI

Senza entrare nei dettagli riguardanti le cause che limitano la precisione dei trasformatori di corrente aventi semplici avvolgimenti secondari, è sufficiente riconoscere che è auspicabile un alto grado di precisione in un trasformatore di corrente, al fine di migliorare la qualità delle letture dei contatori e le indicazioni degli strumenti su cui esse operano.

Consideriamo l'effetto di tali errori quando il secondario è connesso a un contatore di energia elettrica, che ai fini di questa trattazione, assumiamo sia adatto per tutti i tipi di carichi e fattori di potenza entro i limiti considerati. Se lo strumento fosse connesso direttamente alla linea, la velocità (e' un termine caratteristico di alcuni contatori di energia elettrica) sarebbe proporzionale a:

$$S = E I \cos \theta \quad (1)$$

E se assumiamo poi che venga interposto un trasformatore di corrente con rapporto nominale 1:1 si otterrà una velocità proporzionale pari a:

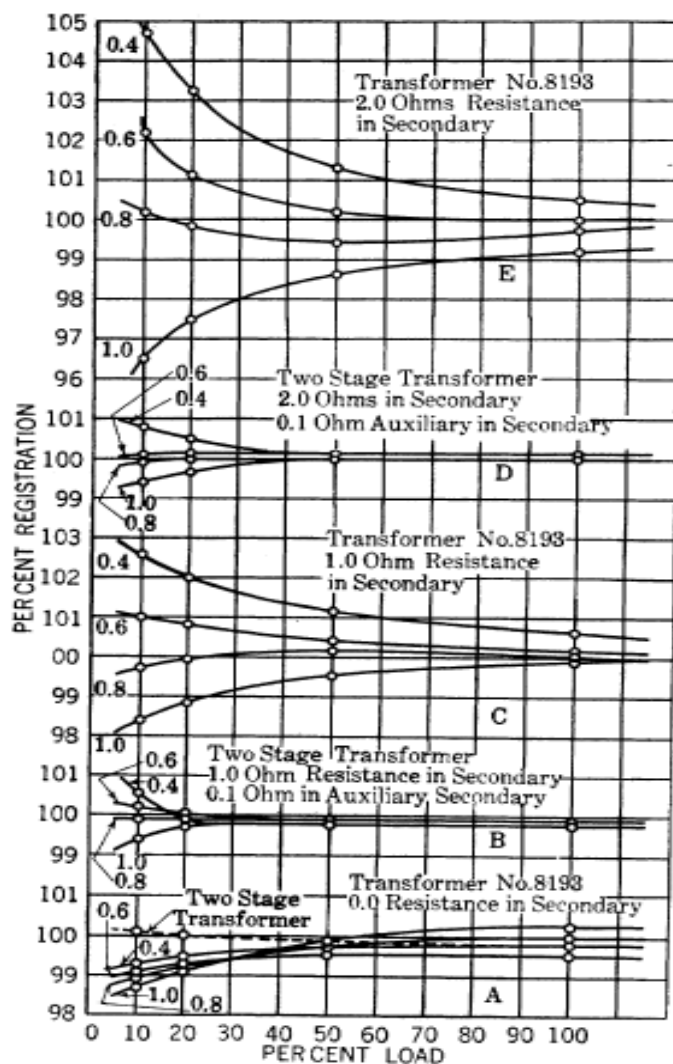
$$S' = \frac{E I}{R} \cos (\theta - \alpha) \quad (2)$$

Dove R è il valore, preso dalla curva di taratura del trasformatore, del quoziente, vero rapporto diviso dal rapporto commerciale, e α è l'errore di fase con la quale l'invertita corrente secondaria conduce o guida la corrente primaria.

Quando si lavora con fattore di potenza unitario, il termine $\cos(\theta - \alpha)$ e' quasi esattamente uguale all'unità in modo che quella che possiamo in qualche modo chiamare "registrazione percentuale" dello strumento sarà quasi inversamente proporzionale al valore di R.

Se il fattore di potenza diminuisce, l'effetto di α si fa sentire sempre di più. Dal momento che per carichi induttivi il valore di θ e' positivo ci sarà la tendenza per lo strumento a "correre più veloce" se il fattore di potenza e' più basso. Come il carico viene abbassato entrambi i valori di R e α incrementano e in generale ce' una lieve tendenza di uno a compensare l'altro, ma nella maggioranza dei casi lo strumento presenterà un incremento della registrazione percentuale per carichi induttivi. Per

valori di fattore di potenza maggiori e' vero l'opposto e se il fattore di potenza e' basso, lo strumento diventa sempre più lento.



La figura 6c mostra molto chiaramente questa caratteristica per carichi induttivi. I dati tracciati mostrano come il livello di precisione del contatore di energia elettrica viene influenzato quando viene connesso alla linea tramite un semplice trasformatore di corrente.

Questo trasformatore presenta un buon rendimento medio.

Le curve mostrano la registrazione percentuale del contatore per diversi carichi e per fattori di potenza indicati. Senza il trasformatore la registrazione percentuale sarebbe stata in ogni caso 100%.

I dati sono stati presi dalla misurazione diretta piuttosto che dal calcolo delle curve dell'errore di rapporto e d'angolo. Nel caso citato il carico secondario era pari a 1 ohm più la resistenza del contatore di energia.

Questo particolare trasformatore aveva circa 1200 ampere spire a pieno carico al primario.

Un trasformatore a doppio stadio e' stato costruito con la stessa quantità di ferro nella sua struttura ma utilizzando solo la metà del numero di ampere spire. I dati sono stati rilevati su questo trasformatore quando e' stato connesso al contatore di energia e per diversi valori di carico secondario. Per un valore di carico secondario pari a zero non c'era praticamente variazione della curva al 100 della registrazione percentuale per tutti i carichi e fattori di potenza. Le figure 6b e 6d mostrano i risultati quando vengono usati carichi secondari rispettivamente da un ohm e due ohm e in entrambi i casi non ce' cambiamento dal 100 della registrazione percentuale per tutti i carichi sopra al 20 per cento. Le figure 6c e 6e mostrano risultati che non reggono il confronto con a, b e d, sebbene il carico secondario nel caso c sia stato molto favorevole e di alta precisione. La figura 6a espone in piene linee la prestazione di un qualunque trasformatore di corrente quando il carico secondario e' costituito dal solo contatore di energia e da 0.1 ohm di resistenza. Le linee tratteggiate mostrano la prestazione di un trasformatore a doppio stadio sotto le stesse condizioni. Per questi ultimi le curve per fattori di potenza variabili erano quasi coincidenti in modo che siano come un'unica linea.

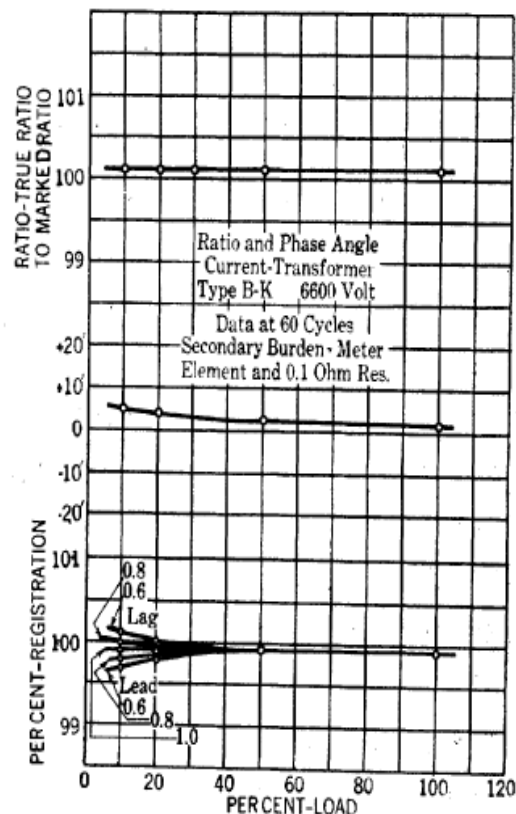


FIG. 7—RATIO, PHASE-ANGLE AND PERFORMANCE CURVES

La figura 7 espone le curve sull'errore di rapporto e d'angolo di un trasformatore di corrente a doppio stadio avente un carico secondario costituito da un contatore di energia elettrica e 0.1 ohm di resistenza. La serie inferiore di curve come quelle di figura 6, mostrano il rendimento in funzione sia del rapporto che dell'angolo di fase.

I dati sopra mostrano la grande utilità del trasformatore a doppio stadio per ottenere il più alto grado di precisione nelle misurazioni elettriche quando è necessario l'utilizzo di un trasformatore di corrente.

Un contatore di energia elettrica gestito da trasformatori di corrente a doppio stadio non ha bisogno di essere calibrato per compensare le imprecisioni dei trasformatori stessi, poiché il secondario principale e il secondario ausiliario insieme forniscono una corrente efficace che possiede in ogni momento la corretta fase e rapporto con la corrente primaria.

Questa condizione è praticamente indipendente da ogni cambiamento di carico secondario, frequenza o effetti di invecchiamento del nucleo principale e nel caso si aprisse il circuito secondario principale, il secondario ausiliario continuerebbe a fornire corrente approssimativamente con lo stesso rapporto.

EFFETTI DELLA MUTUA INDUTTANZA ESTERNA

In generale, in qualsiasi dispositivo, l'introduzione della corrente correttiva ausiliaria implica che i circuiti secondario principale e secondario ausiliario sono magneticamente accoppiati al di fuori del trasformatore.

Questo perché vengono introdotte delle forze elettromotrici all'interno del circuito ausiliario secondario in aggiunta a quelle generate all'interno della bobina secondaria ausiliaria stessa.

Queste forze elettromotrici, se sufficientemente ampie possono diventare pericolose per la riuscita delle operazioni del trasformatore.

Al fine di dimostrare questo effetto, è stato effettuato un esperimento utilizzando un trasformatore di corrente a "doppio stadio": sono stati applicati ad entrambi i circuiti (secondario principale e ausiliari) un carico di 0,25 ohm e un'induttanza di 0,79 mH. Le costanti del trasformatore sono state determinate con le impedenze sopra indicate, successivamente il test è stato ripetuto usando una mutua induttanza di 0,21 mH per accoppiare magneticamente il secondario e il secondario ausiliario al di fuori del trasformatore. Le prove sono state effettuate a 60 Hz.

La tabella seguente mostra il cambiamento delle costanti a seconda della presenza o meno della mutua induttanza:

WITHOUT MUTUAL INDUCTANCE					
Per Cent Load....	10	20	40	60	100
Ratio.....	1.0017	1.0012	1.0010	1.0010	1.0010
Phase Angle.....	5.5'	3.5'	1.5'	0.7'	-0.7'
WITH MUTUAL INDUCTANCE					
Ratio.....	1.016	1.014	1.011	1.010	1.007
Phase Angle.....	5.2'	2.0'	0.0'	-3.5'	-5.6'

I dati sopra riportati dimostrano che l'introduzione della mutua induttanza tra il secondario principale e il secondario ausiliario al di fuori del trasformatore è meno dannosa per l'errore di rapporto del trasformatore.

Va notato comunque che la mutua induttanza usata in entrambi gli esperimenti era circa quattro volte più grande di quella che si trova tra i due avvolgimenti di corrente di un contatore di energia.

Inoltre è facile reperire una mutua induttanza esterna correttiva di eguale valore numerico ma di segno opposto tale da annullare la mutua induttanza che si viene a creare nello strumento.

Questo dispositivo sarebbe costituito da un piccolo nucleo laminato con 2 avvolgimenti.

La pratica abituale di mantenere il carico secondario più basso possibile dovrebbe essere rispettata nel caso del circuito secondario ausiliario e la corrente correttiva dovrebbe essere applicata solo agli apparecchi dov'è richiesta dal punto di vista della precisione.

ALCUNI ASPETTI DI PROGETTAZIONE

Da un punto di vista pratico è auspicabile mantenere uguali le mutue reattanze fra il circuito primario e il secondario ausiliario e tra secondario principale e il secondario ausiliario stesso e organizzare le bobine in modo che entrambe le reattanze varino mantenendo lo stesso rapporto di trasformazione.

Questo, non sarà sempre facile, quando si devono progettare trasformatori di corrente per l'alta tensione, ma in laboratorio, usando trasformatori standard dove l'isolante tra il primario e il secondario può essere ridotto al minimo e il problema diventa meno difficile.

Dividendo i circuiti primario e secondario in un numero di sezioni e intervallando queste sezioni nel nucleo, possono essere ottenute caratteristiche particolarmente interessanti.

Per esempio un trasformatore a due stadi di questo tipo è stato costruito con il circuiti primario e secondario costituiti da due sezioni ciascuno e posizionati nel nucleo nel seguente ordine: P-S-P-S; ampere spire a pieno carico, circa 900.

La seguente tabella mostra le caratteristiche di questo trasformatore con resistenza di 0,1 ohm nei circuiti secondario principale e secondario ausiliario:

Per Cent Load.....	10	20	30	60	100
Ratio.....	1.0005	1.0005	1.0002	1.0002	1.0001
Phase Angle.....	2.0'	1.0'	0.5'	0.0'	0.0'

Per la verifica commerciale dei trasformatori, un trasformatore potrebbe essere considerato come avente un errore di rapporto fisso e un angolo di fase trascurabile.

COLLAUDO DEL TRASFORMATORE DI CORRENTE A DOPPIO STADIO

Quasi tutti i metodi ora in uso per determinare le costanti dei trasformatori di corrente possono, con piccole modifiche, essere applicate a un trasformatore di corrente a doppio stadio.

Per il seguente metodo sarà di particolare interesse per il laboratorio di limitate risorse, perché da risultati sufficientemente precisi per scopi commerciali e non richiede strumenti o apparecchi di precisione tranne un trasformatore di corrente le cui costanti sono note.

Durante un collaudo di un trasformatore di rapporto 1 a 1 anche questo speciale trasformatore non è necessario.

Il rapporto e l'angolo di fase determinati attraverso uno di questi metodi e forniranno le misurazioni effettive dal momento che sono determinate tramite la somma vettoriale delle due.

La figura 8 mostra la disposizione per collaudare un trasformatore di corrente a due stadi con rapporto fra primario e secondario 1 a 1.

Due contatori di energia elettrica a e b sono entrambi dotati di due set di bobine in serie aventi lo stesso numero di spire come una bobina standard da 5 ampere.

Ogni disco è segnato in centesimi di rotazione. Le bobine di potenza sono connesse in parallelo a una sorgente di forza elettromotrice della stessa frequenza di quella che fornisce corrente al circuito primario del trasformatore di corrente e devono essere effettuati degli arrangiamenti laddove la relazione di fase tra la corrente principale I_0 e la forza elettromotrice E applicata può essere alterata.

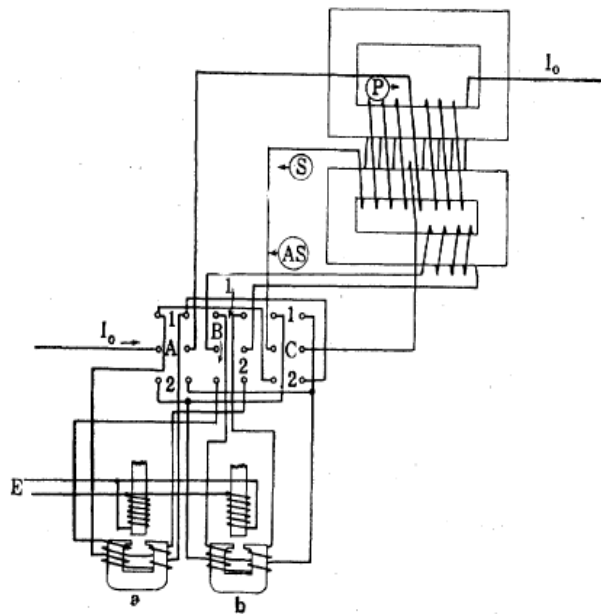


FIG. 8—DIAGRAM OF CONNECTIONS FOR AGNEW TWO-WATT-HOUR-METER METHOD OF TESTING A 1:1 RATIO TWO-STAGE CURRENT TRANSFORMER

Non è necessario che uno dei contatori di energia elettrica sia in perfetta regolazione con fattore di potenza unitario poiché è dimostrato che le costanti dei due contatori di energia elettrica non entrano nei calcoli. In molti casi, comunque, i calcoli sono un po' diminuiti se i due contatori sono tenuti in stretto accordo invece per quanto riguarda le loro costanti.

Non è necessario che il flusso da ciascun polo potenziale sia esattamente 90 gradi in ritardo dalla tensione, ma è desiderabile che l'angolo sia lo stesso per entrambi. Per questa ragione si è ritenuto utile per regolare i contatori di energia elettrica per alcuni bassi fattori di potenza; tipo 20 per cento.

Tre poli doppi (due interruttori azionate) sono previsti come indicato in figura. Posizionando i primi interruttori nelle posizioni A1 B1 C1 il contatore a è connesso al primario del trasformatore con una delle serie di bobine disconnesse mentre il contatore b e i suoi avvolgimenti connessi rispettivamente al secondario e al secondario ausiliario del trasformatore a doppio stadio. Posizionando gli interruttori nelle posizioni A2 B2 C2 le relative posizioni dei contatori di energia sono intercambiabili.

Se quando gli interruttori sono nelle posizioni A1 B1 C1 noi designiamo $a1$ e $b2$ le rotazioni registrate dal contatore a e b in un dato tempo, e con $a2$ e $b1$ le rotazioni registrate dai due contatori a e b quando gli interruttori sono nelle posizioni A2 B2 C2 abbiamo il rapporto del trasformatore

$$R = \sqrt{\frac{a_1 b_1}{a_2 b_2}} \quad (1)$$

Se la forza elettro motrice applicata E e' in fase con la corrente I₀.

Se la forza elettro motrice applicata non e' in fase con la corrente la quantità sotto radice quadrata può essere definita R', il *rapporto apparente* del trasformatore, poiché esso e' dipende non solo dall'effettivo rapporto delle correnti ma pure dall'angolo di fase.

Dal punto di vista dei calcoli e' desiderabile avere gli stessi b₁ e b₂, in alcuni casi, trascurando termini di secondo ordine e superiori abbiamo:

$$R = \sqrt{a_1/a_2} = 1 + \frac{a_1 - a_2}{2 a_2} \quad (2)$$

Quando vengono presi fattori di potenza diversi dall'unita' 1/R*100 sarebbe la registrazione percentuale che il contatore esibisce quando e' posto nel circuito secondario del trasformatore di corrente se fosse corretto quando posizionato nel circuito primario. Tali dati sono di particolare interesse dal punto di vista di chi va a misurare per sapere l'effettivo rapporto e angolo di fase sulla precisione del contatore.

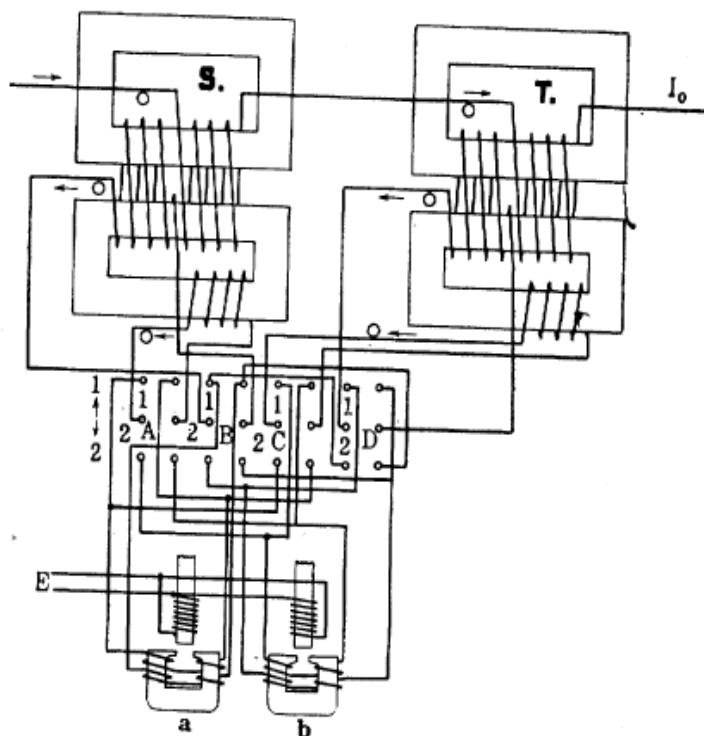


FIG. 9—DIAGRAM OF CONNECTIONS FOR AGNEW TWO-WATT-HOUR-METER METHOD OF TESTING TWO-STAGE CURRENT TRANSFORMERS OF RATIO OTHER THAN UNITY

Gli angoli di fase sono determinati prendendo letture sia per fattori di potenza unitari sia per bassi fattori di potenza usando un wattmetro, un voltmetro e un amperometro per determinare il fattore di potenza per quanto riguarda la corrente primaria e la tensione applicata E. Per questo caso indichiamo con $a1', a2', b1', b2'$ le letture corrispondenti a $a1, a2, b1, b2$ nella prova a fattore di potenza unitario. Quando $b2' = b1'$ abbiamo un angolo di fase :

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\tan \theta} (1 - R/R') \right] \quad (3)$$

Dove $R' = \sqrt{a1'/a2'}$ e' il rapporto apparente per basso fattore di potenza e R e' il rapporto a fattore di potenza unitario mentre θ e' l'angolo tra E e I_0 . Questa formula fornisce l'angolo di fase in radianti. Per scopi pratici, siccome l'angolo e' piccolo, si possono prendere gli angoli uguali alla tangente. Fatto questo e moltiplicato per 3438 per ridurli a minuti, abbiamo:

$$\alpha = \frac{3438}{\tan \theta} (1 - R/R') \text{ (minutes)} \quad (4)$$

La figura 9 mostra la disposizione per la prova di un trasformatore di corrente a doppio stadio il cui rapporto nominale e' diverso dall'unita'. Il trasformatore S viene utilizzato come standard e può essere a doppio stadio o del semplice tipo.

Se e' del semplice tipo non ci sarà una connessione del secondario ausiliario di questo trasformatore all'interruttore come mostrato. Se poniamo:

R1 = rapporto del trasformatore standard S

a1 = angolo di fase del trasformatore standard S

R2 = rapporto del trasformatore a doppio stadio B

a2 = angolo di fase del trasforma a doppio stadio B

che con lo stesso significato legato ai simboli a e b come prima:

$$R_2 = R_1 \sqrt{a_1/a_2} = R_1 \left(1 + \frac{a_1 - a_2}{2 a_2} \right)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left[\frac{1}{\tan \theta} \left(1 - \frac{R_2}{R_1 R_2'} \right) \right] + \alpha_1 \quad (5)$$

Dove **R1R2' = R1√ a1'/ a2'** e' il rapporto apparente a basso fattore di potenza e **b1' = b2'** come prima.

Da questo si può ricavare la formula pratica:

$$\alpha_2 = \frac{3438}{\tan \theta} \left(1 - \frac{R_2}{R_1 R_2'} \right) + \alpha_1 \text{ (minutes)} \quad (6)$$

COSTRUZIONE CON TRE NUCLEI TOROIDALI

La costruzione di un trasformatore di corrente a doppio stadio usando tre nuclei toroidali e' descritto in fig. 1. L'avvolgimento primario e uno dei due avvolgimenti secondari sono avvolti attorno ai tre nuclei. L'altro avvolgimento secondario con lo stesso numero di spire, e' avvolto solamente nel nucleo in mezzo. I due secondari sono connessi in parallelo quindi, la corrente sul carico e' la somma delle due correnti secondarie.

Abbiamo visto nella prima parte di questa discussione che l'errore nel rapporto di corrente nel trasformatore di corrente a doppio stadio e' trascurabile quando il carico e' pari a zero. Questo errore e' dato dall'espressione $e = Z_1 Z_2 / Z_{m1} Z_{m2}$ dove Z_1 e Z_2 sono rispettivamente le impedenze di magnetizzazione del primo e del secondo nucleo. Siccome i rapporti Z_1 / Z_{m1} e Z_2 / Z_{m2} sono piccoli, il loro prodotto e' molto piccolo.

Se, comunque, il trasformatore a doppio stadio e' connesso a un carico non nullo, Z_b , l'errore e' all'incirca pari a $e = Z_b / Z_{m2}$. Vale a dire, l'errore e' causato dalla presenza della corrente magnetizzante del secondo stadio, che e' in funzione della tensione ai capi del carico. E' quindi evidente che la superiorita' del trasformatore di corrente a doppio stadio esiste quando il carico e' circa zero.

Con l'aiuto di un circuito elettronico, il carico nel secondo stadio puo' essere ridotto quasi a zero.

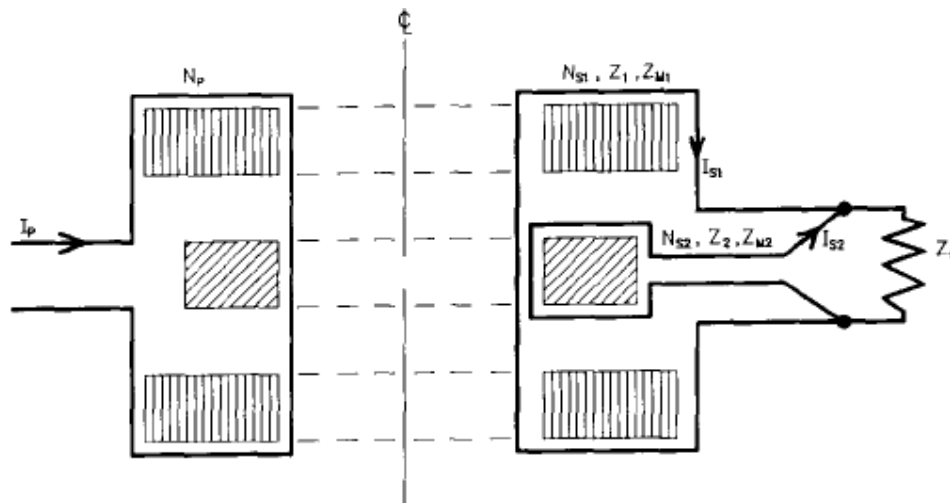


Fig. 1. Construction of a two-stage transformer.

Per esempio, nel circuito di figura 2 (con l'interruttore in posizione 2) l'amplificatore fornisce la tensione V che e' uguale alla tensione ai capi del carico, in modo che la tensione ai capi dell'avvolgimento N_{s2} avvolto attorno il secondo nucleo e' zero e di conseguenza il flusso magnetico e la corrente di magnetizzazione sono pari a zero. Se la seconda corrente magnetizzante e' pari a zero e se entrambi, (errore magnetizzante del trasformatore di corrente causato da correnti capacitive) possono essere trascurati, allora le ampere-spire che bilanciano il secondo nucleo viene dato

dall'espressione $N_p I_p = N_s (I_1 + I_2) = N_s I_s$. Così il rapporto di corrente uguaglia il rapporto spire, e l'errore è pari a zero. Usando appropriate schermature magnetiche per il secondo nucleo permetterebbe la realizzazione di un alto livello di precisione nella trasformazione di corrente (anche al di sotto di 1 ppm).

Con l'interruttore in posizione 3 il concetto è quello di non avere carico al secondo stadio, inducendo in pochi ulteriori avvolgimenti attorno al primo nucleo la tensione V all'incirca uguale alla tensione V sul carico, e connettendo queste spire in serie con l'avvolgimento secondario avvolto attorno al secondo nucleo. In questo modo la corrente di magnetizzazione del secondo nucleo sarà molto diminuita rispetto alla tensione sull'avvolgimento. Un'elevata precisione può essere ottenuta solamente se la regolazione viene fatta su un carico prescritto.

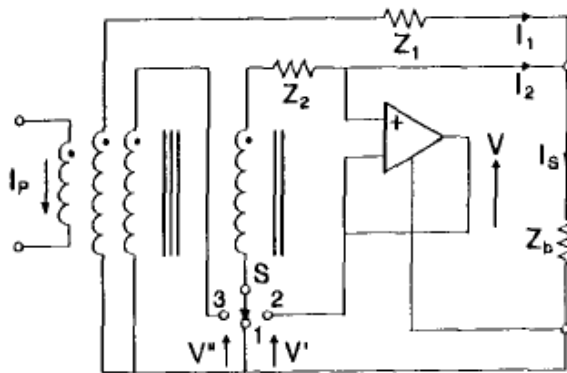


Fig. 2. Two-stage transformer and means for the magnetic flux reduction on the second-stage core.

Vediamo ora di modificare il nostro circuito con appropriate schermature magnetiche.

TEORIA DI FUNZIONAMENTO

Assumiamo che il trasformatore a doppio stadio sia stato costruito con una schermatura magnetica del secondo stadio in modo che, a causa di questa schermatura e della costruzione toroidale del nostro dispositivo, la dispersione delle linee di campo magnetico che raggiungono il secondo nucleo siano ridotte al minimo.

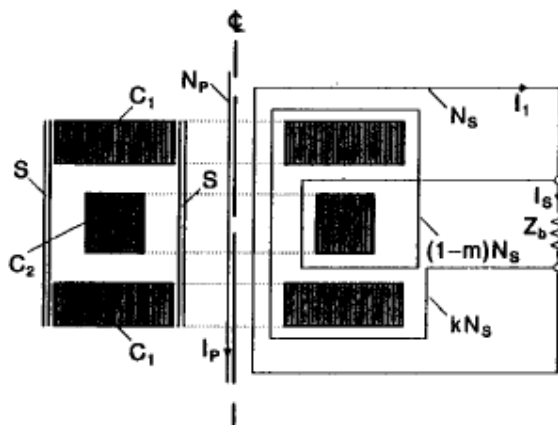


Fig. 3. Design of the improved two-stage transformer.

La figura 3 mostra un modo per approssciare quello che abbiamo detto sopra. Il lavoro del nucleo nel primo stadio viene diviso in 2 parti, C1, che “abbraccia” il nucleo al secondo stadio C2. Due maniche sottili di buon materiale magnetico S vengono inserite, una all’interno e l’altra all’esterno. L’errore magnetico può allora essere trascurato. Assumiamo che questa tecnica sia stata usata per minimizzare le capacità in modo che gli errori capacitivi possono essere trascurati. L’avvolgimento al secondo stadio di $(1-m)N_s$ spire e’ connesso in serie con le kN_s spire avvolto attorno a tutti i nuclei e connesso al carico Z_b . In parallelo con questo avvolgimento, un avvolgimento N_s secondario del primo stadio avvolto attorno ai nuclei e’ connesso al carico Z_b . Il circuito equivalente viene presentato in figura 4:

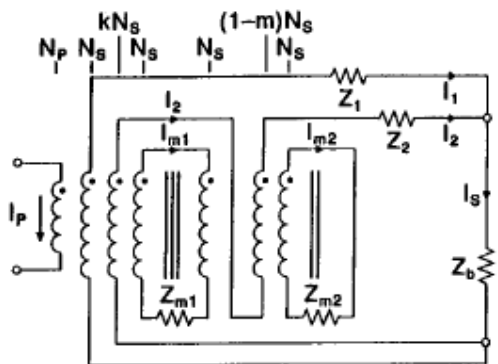


Fig. 4. Equivalent circuit of the improved two-stage transformer.

$Z_1, Z_2, Z_b, Z_{m1}, Z_{m2}$ sono rispettivamente le impedenze interne del primo e secondo stadio, l'impedenza di carico, e le impedenze di magnetizzazione del primo e secondo nucleo riferite alle spire secondarie N_s . N_p e' il numero delle spire primarie. Indicando con E_1 e E_2 le forze elettro motrici indotte a causa dei cambiamenti del flusso magnetico nelle N_s spire del primo e del secondo nucleo, si possono scrivere le seguenti equazioni:

$$N_p I_p - N_s I_1 - k N_s I_2 - N_s I_{m1} = 0 \quad (1)$$

$$N_p I_p - N_s I_1 - (1 - m + k) N_s I_2 - N_s I_{m2} = 0 \quad (2)$$

$$I_s = I_1 + I_2 \quad (3)$$

$$I_{m1} = \frac{E_1}{Z_{m1}} \quad (4)$$

$$I_{m2} = \frac{E_2}{Z_{m2}} \quad (5)$$

$$E_1 - Z_1 I_1 - Z_b I_s = 0 \quad (6)$$

$$k E_1 + (1 - m) E_2 - Z_2 I_2 - Z_b I_s = 0. \quad (7)$$

Da queste equazioni, trascurando i termini di ordine superiore, si ottiene il seguente rapporto:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} (1 + e) \quad (8)$$

Dove l'errore e :

$$e = \frac{(1 - k) (k Z_1 - (1 - k) Z_b)}{Z_{m2} (1 - m)^2} - \frac{(k - m) (Z_1 + Z_b)}{Z_{m1} (1 - m)}. \quad (9)$$

L'errore sarà approssimativamente pari a zero se:

$$\frac{(1 - k) (k Z_1 - (1 - k) Z_b)}{Z_{m2}} = \frac{(k - m) (1 - m) (Z_1 + Z_b)}{Z_{m1}}. \quad (10)$$

Siccome k e m sono reali, l'equazione (10) può esistere se Z_1 e Z_b hanno lo stesso angolo di fase. Da notare che gli errori non dipendono, nella prima approssimazione, dall'impedenza Z_2 dell'avvolgimento del secondo stadio. Sebbene l'errore potrebbe essere zero con $m=0$, e' molto meglio fare $k=m$ in modo che la condizione di errore pari a zero non dipenda dalle impedenze di magnetizzazione e si può semplificare a :

$$k = m = \frac{Z_b}{Z_b + Z_1}. \quad (11)$$

E' ben noto che le impedenze di magnetizzazione cambiano con la densità del flusso e questa e' la prima causa di non linearità dei trasformatori di corrente. Quindi, quando $k=m$ la condizione di errore pari a zero (11) e' notevolmente migliorata. Nella pratica, quando il carico e' costituito da un wattmetro o un contatore di energia elettrica, si può supporre che il carico sia principalmente resistivo con un coefficiente di temperatura del rame.

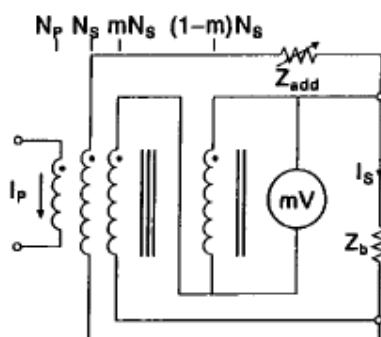


Fig. 5. Adjustment of a resistance inserted into the first-stage secondary winding.

Nella figura 5 un millivolt metro con un'elevata resistenza in ingresso, e' connesso ai capi dell'avvolgimento secondario del secondo stadio e inserita una resistenza variabile al secondario del primo stadio. Questa resistenza e' regolata in modo che il voltmetro riesca a fare letture minime. Il nucleo al secondo stadio, e' senza carico, siccome il flusso e' vicino al valore zero, la corrente di magnetizzazione del secondo stadio sarà trascurabile e le ampere-spire del primario saranno uguali a quelle secondarie.

RISULTATI SPERIMENTALI

Un piccolo trasformatore di corrente a doppio stadio (100:1) e' stato costruito avente un primario formato da una sola spira. Le misure espresse in pollici per i nuclei del primo stadio OD 2.5" ID 1.5" HT 5" e per il secondo stadio un nucleo di OD 2.5" ID 2" HT 5". La grandezza del conduttore #21 per tutti gli avvolgimenti secondari. 88 spire avvolte attorno al secondo nucleo. In serie a questi avvolgimenti, un piccolo avvolgimento di 12 spire e' connesso attorno a tutti i nuclei. I coefficienti k e m , pertanto sono gli stessi $k=m=0.12$.

Con un carico $Z_b=0.15$ ohm non e' stato necessario inserire resistori addizionali nel primo secondario, ma con un carico di $Z_b=0.25$ ohm e' stato necessario aggiungere $Z_{add}=0.9$ ohm in serie con il primo stadio secondario. I risultati sono mostrati nella tabella sotto.

THE ERRORS OF THE IMPROVED TWO-STAGE CURRENT TRANSFORMER

Primary Current Amperes	Burden Ohms	Add. Resistance Ohms	Error $e \approx (p + jq)$ ppm	
			60 Hz	400 Hz
10	0.15	0	$+2 + j10$	$-15 + j4$
50	0.15	0	$+1 + j10$	$-10 + j1$
100	0.15	0	$+2 + j5$	$18 + j1$
10	0.25	0	$-50 + j940$	$-23 + j153$
50	0.25	0	$-93 + j806$	$-23 + j141$
100	0.25	0	$-134 + j730$	$-23 + j139$
10	0.25	0.9	$+2 + j1$	$-10 + j3$
50	0.25	0.9	$+1 + j1$	$-7 + j1$
100	0.25	0.9	$+1 + j0$	$-5 + j0$

CONCLUSIONI

Studi teorici e sperimentali sul comportamento di un trasformatore di corrente a doppio stadio hanno dimostrato che la sua linearità e la precisione potrebbero essere considerevolmente migliorati se il carico è conosciuto. Per ottenere questo, il secondario del secondo stadio dovrebbe essere diviso in due parti. La prima parte (approssimativamente al 70-90 % delle spire) dovrebbe avvolgere il secondo nucleo e la seconda parte (circa 30-10 % delle spire) dovrebbe avvolgere tutti i nuclei. Queste due parti dovrebbero essere connesse in serie e connesse ai terminali del carico in parallelo con il secondario del primo stadio. La registrazione della precisione può essere fatta inserendo una resistenza in serie con il secondario del primo stadio in modo che la tensione indotta dal secondo nucleo sia zero. Questo tipo di schema non è buono come quello in cui può essere usato un circuito elettronico in cui viene permessa una variazione del carico ma, è molto più semplice, meno costoso e più affidabile.

VANTAGGI DEL TRASFORMATORE A DOPPIO STADIO

In conclusione si possono evidenziare alcuni vantaggi del trasformatore a doppio stadio.

Dal punto di vista ingegneristico e' possibile ridurre notevolmente la quantità di rame e ferro per dare risultati che sono perlomeno buoni o meglio rispetto a quelli raggiunti oggi dai trasformatori di più alta qualità che vengono prodotti.

Non e' necessario avere un'accurata conoscenza delle proprietà magnetiche usate nel ferro. Con una quantità ragionevole di materiale usato, l'inesattezza della misurazione a causa della presenza di trasformatori di corrente, può essere ridotta a una quantità trascurabile. Ciò e' in contrasto con il trasformatore di corrente medio la cui precisione nelle condizioni di funzionamento lascia spesso a desiderare. Anche con un determinato carico secondario non può essere compensato per tutti i carichi e fattori di potenza come le curve dei grafici mostrano chiaramente.

Il risultato del questionario inviato recentemente alle più grandi compagnie di energia elettrica dal *Meter committee of the National electric light association* espone che: l'installazione di trasformatori di corrente separati e' stata segnalata in pratica in tutti i casi per contatori di energia elettrica, pur indicando, strumenti e altri dispositivi, inclusi relè, combinati nello stesso trasformatore. L'uso di un trasformatore a doppio stadio darebbe una buona o una migliore precisione nella lettura della misurazione e potrebbe far risparmiare il costo di un trasformatore in più e anche lo spazio occupato dallo stesso.

Trasformatori di corrente di grande portata, oltre a facilitare i test di precisione, possono garantire che avendo approssimativamente il numero corretto di spire al primario e nel secondario principale e l'esatto rapporto spire al primario e nel secondario ausiliario il rapporto sarà precisamente corretto e l'angolo di fase trascurabile.

Trasformatori di comune costruzione aventi un piccolo numero di avvolgimenti secondario non può essere portato a un esatto rapporto perché non e' possibile ridurre il numero degli avvolgimenti. Questa difficoltà e' assente nel trasformatore a doppio stadio.

Un contatore di energia elettrica che funziona con un trasformatore a doppio stadio non ha bisogno di aggiustamenti speciali per aggiustare gli errori di rapporto e quelli d'angolo del trasformatore e il lavoro nel testare questi contatori di energia elettrica sarà semplificato così come il costo per testarli.

Una importante possibile applicazione del trasformatore di corrente a doppio stadio e' nella misurazione nei test di collaudo dell'uscita dei generatori in corrente alternata. Nel caso di grandi macchine e' di consuetudine stipulare una larga penalità per ogni percentuale entro il quale il rendimento scende al di sotto di quello che era stato stipulato nel contratto, e inversamente un grande premio nel caso di un rendimento superiore a quello stipulato. E' pertanto fortemente auspicabile usare trasformatori di corrente che hanno un rapporto costante e che non richiedano fastidiose correzioni degli errori d'angolo. L'avvolgimento ausiliario può essere applicato ad indicare wattmetri come contatori di energia elettrica.

RELAZIONI MATEMATICHE

Nella discussione che segue le relazioni matematiche sottostanti l'azione del trasformatore di corrente a doppio stadio vengono stabilite, e il confronto viene fatto con le relazioni corrispondenti per il trasformatore di corrente comune.

Saranno utilizzati i seguenti simboli:

I0, I1 e I4	corrente primaria, secondaria principale e secondaria ausiliaria.
X1,X1...X4	reattanze delle diverse bobine come indicato dal pedice e in Fig.1
Z3	impedenza del carico principale più la resistenza delle bobine 1 e 3
Z4	impedenza del carico ausiliario più la resistenza della bobina 4
X01,X23 ecc.	mutue reattanze tra le bobine
N0,N1...N4	numero di avvolgimenti per bobina
μ1 μ2	permeabilità nel ferro nel nucleo principale e in quello ausiliario
α1, α4	sezione trasversale del ferro nei rispettivi nuclei
l1,l4	lunghezza del circuito magnetico nei rispettivi nuclei
ω	2 π per la frequenza
j	√-1
D1,D4	fattori di perdita(approssimativamente pari a 1)
δ01, δ23..ecc	differenze di perdita
c	$\alpha_4 \mu_4 D_4 l_1 / \alpha_1 \mu_1 D_1 l_4$
z3,z4	Z_3/X_1 e Z_4/X_1
η34...ecc.	$\delta_{34} \mu_{34} \dots$
ξ	Z_4/X_4

Durante lo sviluppo , le correnti, impedenze e permeabilità saranno considerati come vettori su un piano e il rapporto finale sarà ottenuto come un numero complesso in cui il modulo e' il rapporto e l'argomento e' l'angolo di fase.

Applicando le leggi di kirchoff al circuito secondario dimostrato in Fig. 1 e otteniamo:

$$I_1 [Z_3 + j (X_1 + X_3)] + I_4 j X_{34} = - I_0 j (X_{01} + X_{23}) \quad (8)$$

$$I_1 j X_{34} + I_4 (Z_4 + j X_4) = - I_0 j X_{24} \quad (9)$$

Risolvendo queste due equazioni abbiamo

$$I_1 = - I_0 \frac{j (X_{01} + X_{23}) (Z_4 + j X_4) + X_{34} X_{24}}{(Z_4 + j X_4) [Z_3 + j (X_1 + X_3)] + X_{34}^2} \quad (10)$$

$$I_4 = - I_0 \frac{j X_{24} [Z_3 + j (X_1 + X_3)] + X_{34} (X_{01} + X_{23})}{(Z_4 + j X_4) [Z_3 + j (X_1 + X_3)] + X_{34}^2} \quad (11)$$

Ora ciascuna delle reattanze (X_{mn}) può essere suddivisa in una serie di fattori in modo che

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \omega \frac{4\pi}{10} \frac{a_1}{l_1} \mu_1 N_1^2 D_1 \\ X_3 &= \omega \frac{4\pi}{10} \frac{a_4}{l_4} \mu_4 N_3^2 D_4 (1 - \delta_3) \\ X_4 &= \omega \frac{4\pi}{10} \frac{a_4}{l_4} \mu_4 N_4^2 D_4 \\ X_{01} &= \omega \frac{4\pi}{10} \frac{a_1}{l_1} \mu_1 N_0 N_1 D_1 (1 - \delta_{01}) \\ X_{23} &= \omega \frac{4\pi}{10} \frac{a_4}{l_4} \mu_4 N_2 N_3 D_4 (1 - \delta_{23}) \\ X_{24} &= \omega \frac{4\pi}{10} \frac{a_4}{l_4} \mu_4 N_2 N_4 D_4 (1 - \delta_{24}) \\ X_{34} &= \omega \frac{4\pi}{10} \frac{a_4}{l_4} \mu_4 N_3 N_4 D_4 (1 - \delta_{34}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

In queste espressioni i fattori di perdita D_1 e D_2 sono quelli con i quali le induttanze delle bobine 1 e 4 differiscono rispettivamente da quelli calcolati mediante la formula ben conosciuta.

Nel caso delle altre reattanze le corrispondenti differenze sono consentite per l'introduzione delle quantità δ che sono in casi concreti piccoli rispetto a 1.

Se ora ci limitiamo al caso pratico dove $N_3 = N_4$ e $N_0 = N_2$,

$$c = \frac{a_4 \mu_4 D_4 l_1}{a_1 \mu_1 D_1 l_4} \quad (13)$$

e si lascia

$$Z_3/X_1 = z_3, \quad Z_4/X_1 = z_4 \quad (14)$$

e arriviamo a fare le varie sostituzioni. le due equazioni:

$$I_1 = -I_0 \times \frac{\frac{N_2}{N_1} \left\{ 1 - \delta_{01} + \frac{N_3}{N_1} c (-\delta_{23} + \delta_{31} + \delta_{24} - \delta_{34} \delta_{24}) - j \left[z_4 \left(\frac{N_1^2}{N_3^2 c} + \frac{N_1}{N_3} \right) - z_4 \left(\frac{\delta_{01} N_1^2}{N_3^2 c} - \frac{\delta_{23} N_1}{N_3} \right) \right] \right\}}{1 - \frac{N_3^2}{N_1^2} c (-\delta_3 + 2 \delta_{34} - \delta_{34}^2) - j \left[z_3 + z_4 \left(1 - \delta_3 + \frac{N_1^2}{N_3^2 c} \right) \right]} \quad (15)$$

e

$$I_4 = -I_0 \times \frac{\frac{N_2}{N_1} \left[\frac{N_1 - N_3}{N_3} - \frac{N_1}{N_3} \delta_{24} + \delta_{01} + \delta_{34} + \frac{N_3}{N_1} c (-\delta_3 - \delta_{24} + \delta_{23} + \delta_{34} - \delta_{23} \delta_{24} + \delta_3 \delta_{24}) - j z_3 \frac{N_1}{N_3} (1 - \delta_{24}) \right]}{1 - \frac{N_3^2}{N_1^2} c (-\delta_3 + 2 \delta_{34} - \delta_{34}^2) - j [z_3 + z_4 (1 - \delta_3 + \frac{N_1^2}{N_3^2 c})]} \quad (16)$$

Mentre questi separatamente sono funzioni complicate dei fattori di perdita e carico si noterà che i termini δ e z sono in pratica piccoli rispetto a 1 e quindi possiamo trascurare del tutto le potenze superiori e i prodotti di tali quantità. Se viene fatto questo, la divisione tra numeratore e denominatore può essere fatta in modo esplicito e otteniamo:

$$I_1 = -I_0 \frac{N_2}{N_1} \left[1 - \delta_{01} + \frac{N_3}{N_1} c (-\delta_{23} + \delta_{34} + \right. \\ \left. \delta_{21}) - \frac{N_3^2}{N_1^2} c (2\delta_{34} - \delta_3) + \dots + \right. \\ \left. j \left(z_3 + z_4 \frac{N_3 - N_1}{N_3} + \dots \right) \right] \quad (17)$$

$$I_4 = -I_0 \frac{N_2}{N_1} \left\{ \frac{N_1 - N_3}{N_3} + \delta_{01} - \frac{N_1}{N_3} \delta_{24} + \right. \\ \left. \delta_{34} + \frac{N_3}{N_1} c (\delta_{23} - \delta_{34} - \delta_{24}) + \right. \\ \left. \frac{N_3^2}{N_1^2} c (2\delta_{34} - \delta_3) + \dots - \right. \\ \left. j \left[z_3 - z_4 \left(1 + \frac{N_1^2}{N_3^2 c} \right) \right] \right\} \quad (18)$$

Si vedrà che la maggior parte dei termini della (18) sono uguali in modulo e di segno opposto ai termini corrispondenti della (17), che è ovviamente l'espressione matematica per il fatto fisico che I_4 ha quasi il valore corretto per compensare la partenza di I_1 dal suo valore ideale $-I_0 N_2/N_1$.

Se dunque si calcola il rapporto efficace nella formula usuale otteniamo, dopo un riassetto dei termini

$$\text{Ratio} = \frac{I_0}{I_1 + I_4} = -\frac{N_3}{N_2} \left\{ 1 - \frac{N_3}{N_1} \delta_{34} + \delta_{24} + \right. \\ \left. \dots + j \left[z_4 \frac{(N_1 - N_3) N_1}{c N_3^2} + \dots \right] \right\} \quad (19)$$

La corrispondente espressione per un trasformatore a singolo stadio del solito tipo è:

$$\text{Ratio} = \frac{I_0}{I_1} = - \frac{N_1}{N_0} [1 + \delta_{01} + . . . - j (z_3 + . . .)] \quad (20)$$

A confronto le equazioni (19) e (20) mostrano uno dei vantaggi della trasformazione a doppio stadio. Se N_1 e' uguale a N_3 rispetto al rapporto nella (19) diventa indipendente dai carichi secondari e se in aggiunta

$\delta_{34} = \delta_{24}$ il rapporto diventa costante e uguale a N_3/N_2 .

Per vedere più in dettaglio l'effetto delle diverse condizioni di funzionamento del dispositivo possiamo fare alcune ulteriori trasformazioni algebriche e dobbiamo introdurre alcune ipotesi. E' evidente dalla (20) che se δ_{01} e z_3 erano costanti, il trasformatore di corrente avrebbe avuto un rapporto e un angolo di fase costante a tutte le frequenze e tipo di carico. Di conseguenza l'intera variazione del rapporto di trasformazione con la corrente e la parte principale di questa variazione con frequenza e carico sono dovute al fatto che la permeabilità non e' costante e le perdite nel nucleo non variano in proporzione con il quadrato della densità del flusso. Nell'equazione (12) alcuna menzione e' stata fatta sulle perdite nel nucleo ma questo ha reso facilmente considerabile μ essere una quantità complessa avente una componente reale proporzionale alla componente della tensione indotta e in quadratura con la corrente magnetizzante e parte immaginaria proporzionale alla componente delle perdite nel nucleo della tensione indotta. Le differenze di perdita δ sono circa una stima del rapporto tra il flusso perso in aria e quello totale che e' principalmente nel ferro. Di conseguenza queste quantità, circa, saranno inversamente proporzionali alla permeabilità del ferro. Anche le quantità z_3 e z_4 coinvolte, come fanno X_1 o X_4 nel denominatore saranno inversamente proporzionali a μ . Possiamo quindi almeno approssimativamente porre:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{34} &= \eta_{34}/\mu_4 \\ \delta_{24} &= \eta_{24}/\mu_4 \\ z_3 &= \zeta_3/\mu_4 \\ \frac{N_1^2 z_4}{N_3^2 c} &= \frac{\zeta_4}{\mu_4}, \quad \text{or} \quad \zeta_4 = \frac{Z_4}{X_4} \mu_4 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

L'inserimento di queste relazioni nella (13) e (14) da il rapporto (doppio stadio):

$$- \frac{N_3}{N_2} \left[1 + \left(\eta_{24} - \frac{N_3}{N_1} \eta_{34} + j \zeta_4 \frac{N_1 - N_3}{N_1} \right) \frac{1}{\mu_4} \right] \quad (22)$$

E un rapporto (singolo stadio):

$$- \frac{N_1}{N_0} \left[1 + (\eta_{01} - j \zeta_3) \frac{1}{\mu_1} \right] \quad (23)$$

Le equazioni non possono essere più “spinte” di così a meno che la permeabilità possa essere espressa come una funzione definita della densità di flusso. Si può notare, comunque, che la densità di flusso a cui il nucleo lavora è proporzionale al netto della tensione indotta per spira e varia inversamente con la frequenza. Conseguentemente per alte frequenze o piccole correnti e carichi μ sarà piccola ma abbastanza costante mentre ad un alta densità di flusso corrispondente a una bassa frequenza o grandi correnti e carichi μ sarà grande ma varierà molto rapidamente con la corrente. Dato che nel nucleo ausiliario circolerà solamente una corrente ausiliaria molto piccola attraverso il piccolo carico ausiliario, la densità di flusso in esso è bassa e μ_4 nell'equazione (22) è abbastanza costante anche se piccola. Nel trasformatore a singolo stadio il flusso deve essere sufficiente per far circolare l'intera corrente secondaria e μ_1 nell'equazione (23) varierà piuttosto rapidamente con la corrente.

Il principale guadagno dalla trasformazione a doppio stadio, comunque, è visto dal coefficiente $1/\mu_4$ nell'equazione (22) che comporta solo la differenza di due fattori di perdita vicini invece di uno solo. Inoltre il carico secondario principale non entra tutto nel primo ordine dei termini dell'equazione (22) per il trasformatore a doppio stadio, e il carico ausiliario è un multiplo del fattore

$$\frac{N_1 - N_3}{N_1}$$

che è sempre piccolo e può essere pari a zero se desiderato.

Per fare $N_1 = N_3$ comunque in generale si renderà l_4 più grande se N_1 è leggermente inferiore a N_3 . Il conseguente incremento della densità di flusso nell'ausiliario, nella variabile μ_4 e in termini di secondo ordine può più neutralizzare il miglioramento nel termine ζ_4 .

L'equazione (22) mostra molto chiaramente l'effetto della mutua induttanza esterna tra i circuiti secondario principale e secondario ausiliario, poiché tale effetto è

equivalente ad aumentare η_{34} e distruggerà direttamente il bilancio tra δ_{34} e δ_{24} . Di questo effetto si fa riferimento in parte in questo documento.

Nel complesso si è visto che gli errori del trasformatore a singolo stadio sono stati ridotti a un ordine di grandezza più piccolo con l'uso della trasformazione a doppio stadio. Questo è confermato dai risultati sperimentali che mostrano che un trasformatore che opera con singolo stadio contiene errori di molti punti percentuali mentre nelle operazioni a doppio stadio mostrano errori di solo un decimo di tale importo o anche meno.

TRASFORMATORE A DOPPIO STADIO PER MISURAZIONI IN ALTA TENSIONE

Nel seguente documento viene descritto lo sviluppo nella misurazione della corrente in sistemi ad alta tensione. Il sistema è basato su un “prototipo” trasformatore di corrente con un circuito elettronico che esegue una conversione A/D. Il sistema usa una fibra ottica per trasmettere i dati a una stazione di terra e una fibra ottica particolare con l'impiego di un laser per fornire energia ai circuiti elettronici a quello che possiamo chiamare modulo remoto in alta tensione. L'incertezza sulla misurazione del rapporto di corrente è valutata meno del $100 \cdot 10^{-6}$ sia in fase che in quadratura.

INTRODUZIONE

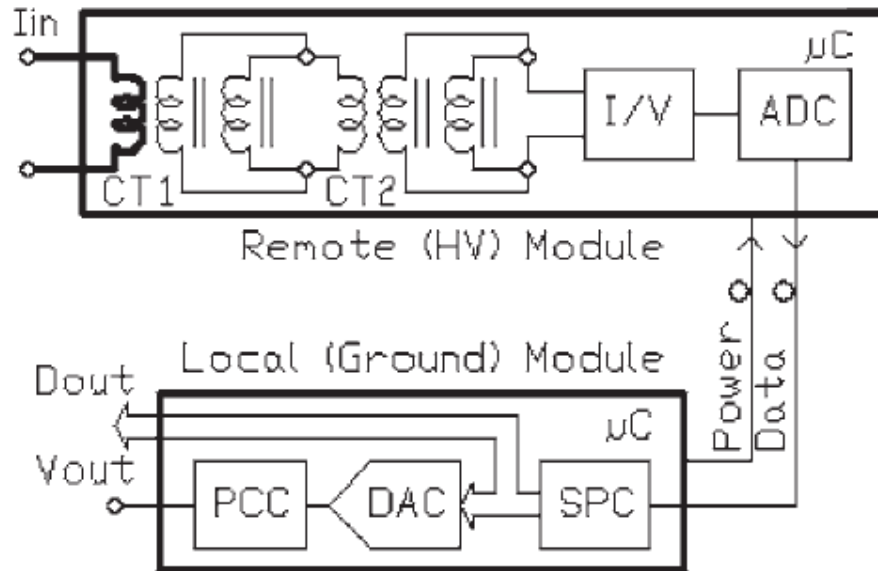
La misurazione dell'energia elettrica in sistemi ad alta tensione richiede uno strumento preciso per il ridimensionamento di correnti e tensioni a un livello adeguato per la misurazione. Per molti scopi pratici, questo viene fatto da trasformatori. Attualmente, le precisioni più severe per trasformatori di misura sono in 0.3% o 0.2%. Comunque, per applicazioni ad alta precisione, come ad esempio misurazioni sotto condizioni di basso fattore di potenza, oppure esperimenti di laboratorio ecc., sono richiesti dei dispositivi molto precisi.

Un sistema di taratura richiede una precisione almeno quattro, o preferibilmente, dieci volte migliore di un altro comune sistema. Per una classe di precisione dello 0.2% significa che l'errore di rapporto sulla corrente del trasformatore deve essere all'interno del $200 \cdot 10^{-6}$.

The National Research Council del Canada, ha ricevuto un numero di richieste per fornire in luogo tarature degli strumenti di misura in sistemi con tensioni tra i 69 e i 350KV. Trasformatori per applicazioni in alta tensione richiedono avvolgimenti isolati per sostenere il livello di isolamento di base del sistema di tensione e ciò richiede l'utilizzo di appropriati materiali isolanti e altri componenti, con il conseguente aumento ad esempio, del costo globale del dispositivo di misura. Questo testo espone un progetto di un “ibrido” trasformatore di corrente a doppio stadio isolato per le operazioni in alta tensione con precisione migliore di un normale trasformatore di corrente convenzionale.

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Prendiamo in considerazione il seguente schema a blocchi:



Esso è composto da quello che possiamo chiamare modulo remoto o unità alta tensione e un modulo locale o (ground station) che sono entrambe controllate da un microcomputer (μC). Quando questo nuovo tipo di trasformatore di corrente a doppio stadio funziona e viene collegato all'alta tensione, i dati digitali dal modulo remoto vengono trasferiti al modulo locale attraverso una fibra ottica la quale fornisce anche la distanza necessaria per l'isolamento. In aggiunta la fibra ottica provvede a trasferire la potenza dal modulo locale all'unità alta tensione. Il modulo remoto è composto da due trasformatori di corrente a doppio stadio che indichiamo rispettivamente con CT1 e CT2 connessi in cascata, e da un circuito elettronico connesso al secondario del secondo trasformatore di corrente.

Il trasformatore di corrente a doppio stadio ha tre avvolgimenti e due nuclei magnetici. L'avvolgimento di eccitazione è avvolto sopra ad un unico nucleo. Come un trasformatore unico ha caratteristiche che si avvicinano di molto a quelle di un trasformatore ideale quando lavora con carico esterno di valore zero.

Gli errori in fase e in quadrature del rapporto di corrente senza carico sono nell'ordine del $1 \cdot 10^{-6}$ o meno. Il rapporto non è influenzato dal livello del segnale. Comunque, i vantaggi sulla precisione nella tecnica del doppio stadio diminuiscono se il carico esterno aumenta di valore.

In questo nuovo sistema, il primo trasformatore di corrente a doppio stadio ha un rapporto di corrente di $1000 \text{ A} / 1 \text{ A}$, e il secondo ha un rapporto di corrente di $1 \text{ A} / 0.001 \text{ A}$. Pertanto, il collegamento in cascata dei due trasformatori di corrente a doppio stadio comporta un rapporto di corrente totale di $1000 \text{ A} / 0.001 \text{ A}$, o un equivalente rapporto spire di $1000000/1$.

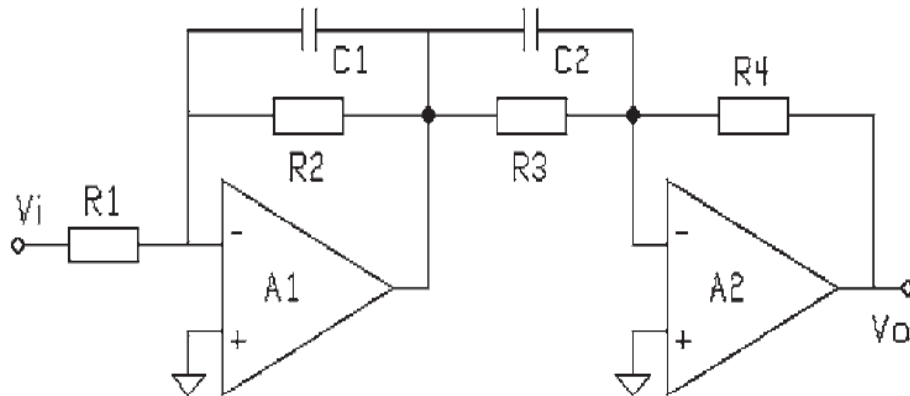
Il circuito elettronico è formato da un convertitore corrente/tensione (I/V), da un convertitore analogico digitale a 16 bit (ADC) e da un diodo laser. Il convertitore I/V è accoppiato all' ADC per fornire una rappresentazione digitale del segnale della corrente primaria. Il convertitore I/V è stato progettato in modo tale che rappresenti a carico pari a zero all'avvolgimento secondario del secondo trasformatore di corrente alla frequenza di rete, ottimizzando in questo modo le prestazioni complessive del nostro nuovo "ibrido" trasformatore di corrente. Piccole impedenze al secondario del secondo trasformatore di corrente causano grandi guadagni in corrente continua del convertitore I/V, che a sua volta potrebbe dare luogo a una componente continua nella tensione di uscita dell'I/V. Questa componente può essere ridotta al minimo regolando l'ingresso di uscita dell'I/V. Per portare l'ADC alle sue condizioni di funzionamento nominali, il convertitore I/V ha anche un intervallo di regolazione nei rapporti 1.5 e 10.

L'energia del circuito elettronico del modulo remoto viene fornita dal modulo locale tramite un avanzato sistema di collegamento guidato laser. La limitata potenza di questo collegamento impone dei vincoli sulla scelta dei componenti e sulla progettazione del circuito del modulo remoto. Il consumo del circuito elettronico è basso ma sufficiente a gestire la conversione I/V di 0.001 A di corrente in uscita dal secondo trasformatore di corrente, della conversione analogico-digitale e della trasmissione dei dati.

Il modulo locale è composto da circuiti elettronici e da componenti che sfruttano un laser, e' composto anche da un convertitore serie/parallelo (SPC), da un convertitore D/A a 16 bit (DAC) e da un circuito di "correzione di fase" (PCC) IL DAC e il PCC permettono una valutazione del valore della corrente misurata nel sistema di dominio analogico usando la tecnica del comparatore di corrente. Il modulo fornisce inoltre anche un possibile segnale di controllo. Va notato che i campioni dei dati digitali potrebbero essere utilizzati per particolari calcoli (ad esempio valore efficace della fondamentale e armoniche). Per ottenere informazioni sulla fase del segnale in ingresso, è necessario un circuito di sincronizzazione per fornire il tempo di riferimento comune ad un altro sistema di campionamento.

Campionando il segnale in ingresso con una frequenza di campionamento costante, il trasferimento di dati e la ricostruzione dei dati, implica un ritardo costante nel tempo del segnale all'uscita del DAC rispetto al segnale in ingresso. Per segnali di ingresso alla frequenza di rete e frequenze di campionamento sotto i 100 KHz, il ritardo costante nel tempo significa un ritardo nella fase nell'ordine di circa 1 grado. Inoltre, questo spostamento di fase dipende linearmente con la frequenza.

Per esempio, per una classe di precisione dello 0.2 di un trasformatore di corrente, il limite dell'errore di fase, al 100% della corrente nominale è 10° (minuti angolari).Pertanto, è necessario compensare il ritardo di fase introdotto dal campionamento. Il PCC usato è illustrato di seguito.



Il circuito presenta una dipendenza inversa alla frequenza del segnale di ingresso. Con i valori appositamente scelti per le costanti di tempo $R2C1$ e $R3C2$, lo spostamento di fase tra I_{in} e la V_{out} può essere portato al di sotto dei zero gradi. Condensatori con coefficienti di temperatura (TCs) migliori di $30 \cdot 10^{-6}$ K sono componenti disponibili in commercio a basso costo. I loro TCs possono essere combinati se necessario per migliorare ulteriormente la stabilità della temperatura. Il modulo è dipendente dalla frequenza ad una relativamente piccola estensione a $43.7 \cdot 10^{-6}$ Hz.

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

La prestazione del sistema di misura è stata verificata valutando i componenti individuali cioè il trasformatore di corrente a doppio stadio e l'ADC, e anche il sistema complessivo.

Gli errori del primo trasformatore di corrente a doppio stadio CT1, sono stati valutati usando la tecnica del comparatore di corrente. Al valore nominale di corrente di 1000 A, gli errori sul rapporto di corrente sono meno del $3 \cdot 10^{-6}$ in fase e $2 \cdot 10^{-6}$ per la quadratura, a un carico di 0.1 ohm. La linearità contro corrente dal 100% del valore nominale scende dell'1% della corrente nominale e gli errori sono migliori del $5 \cdot 10^{-6}$ in fase e $3 \cdot 10^{-6}$ in quadratura. Incrementando il carico a 1 ohm si ha un impatto sulla componente in fase di meno del $1.5 \cdot 10^{-6}$ e un impatto meno del $15 \cdot 10^{-6}$ sulla componente in quadratura.

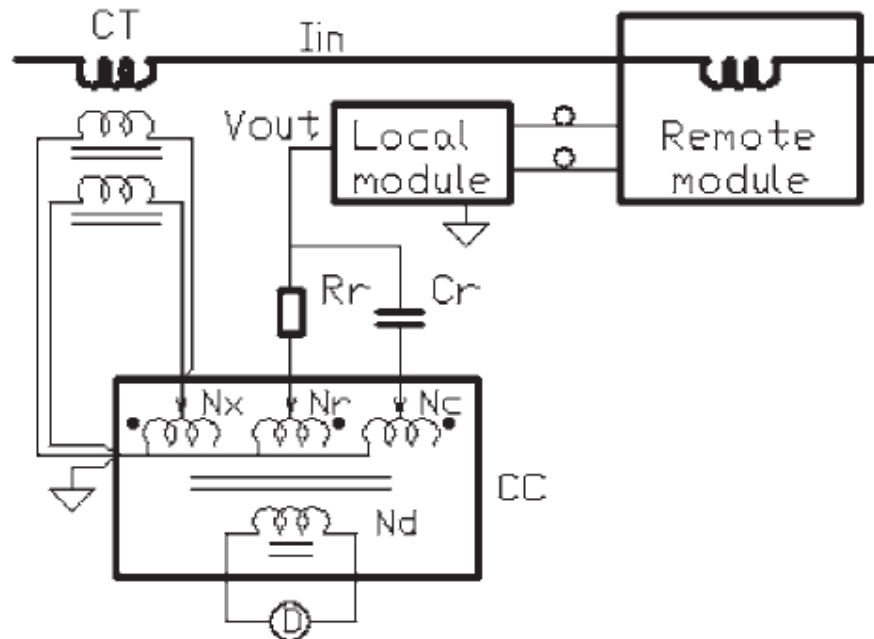
Il secondo trasformatore di corrente a doppio stadio CT2, sotto condizioni di carico pari a zero, è stato trovato ad avere errori di rapporto meno del $5 \cdot 10^{-6}$ sia per la componente in fase che in quadratura.

La linearità dell'ADC a 16 bit per il segnale in continua in ingresso è meglio di 1 LSB, o $15 \cdot 10^{-6}$ rispetto alla sua scala. Va notato che questo errore si riflette con un

fattore $2\sqrt{2}$ sul valore efficace delle misurazioni, diventando $43 \cdot 10^{-6}$. Un ragionamento analogo vale anche per gli errori dell'ADC.

La taratura di una parte di questo nuovo sistema di misura tra la tensione in ingresso del modulo remoto ADC e la tensione di uscita del modulo locale DAC e' stata eseguita tramite un comparatore di corrente a ponte simile a quello riportato nella figura sotto. La taratura e' stata effettuata ad una frequenza tra i 57 e i 63 Hz. Nella scala di valori sulla tensione di ingresso tra il 30%-100% l'errore di fase era all'interno di $\pm 40 \cdot 10^{-6}$. Nel valore della tensione di ingresso tra 10%-100% l'errore di quadratura era all'interno di $\pm 10 \cdot 10^{-6}$. Gli errori aumentano al di fuori degli intervalli specificati.

La taratura dell'intero dispositivo e' mostrata nella figura seguente:



Viene utilizzato un trasformatore di corrente a doppio stadio CT, una resistenza di riferimento R_r , un condensatore C_r , e un comparatore di corrente CC. La taratura e'

stata effettuata con correnti fino a 1000 A a 60 Hz. L'incertezza della misurazione e' stata stimata essere entro il $10 \cdot 10^{-6}$ sia in fase che in quadratura.

La linearità contro corrente in ingresso mostra che nell'errore in fase del nostro dispositivo e' tra $\pm 35 \cdot 10^{-6}$.

nel valore tra il 30%-100% della corrente nominale. Sotto il 30% del valore nominale, il valore assoluto dell'errore incrementa significativamente. Per esempio, e' raggiungibile $-480 \cdot 10^{-6}$ al 5% della corrente nominale. L'errore in quadratura e' entro $\pm 25 \cdot 10^{-6}$ nella variazione tra 5%-100% della corrente nominale, aumentando significativamente in valore assoluto per valori di correnti basse.

Introducendo un cambiamento nel range della corrente nel convertitore I/V porta l'ADC in condizioni operative migliori, aumentando la sensibilità e pertanto migliora l'errore per valori bassi di corrente. Per esempio, incrementando il guadagno del convertitore I/V di un fattore 10 porta l'errore in fase entro $\pm 30 \cdot 10^{-6}$, nel range del 2%-10% della corrente nominale. L'errore in quadratura e' tra $\pm 10 \cdot 10^{-6}$ nello stesso range 2%-10% della corrente nominale. Il miglioramento e', comunque, a costo di un incremento del guadagno in dc. Per piccoli range della corrente in ingresso cioè, per guadagni alti del convertitore I/V, il guadagno dc aumenta e disturbi e instabilità nel segnale di uscita del convertitore I/V aumentano. Tutto questo si riflette sui risultati della misurazione e deve essere fatta una scelta per quanto riguarda il massimo accettabile guadagno del convertitore I/V.

A causa delle "oscillazioni" giornaliere delle caratteristiche dell' A/D e dell'ADC, la stabilità globale del guadagno e' all'incirca sui $40 \cdot 10^{-6}$. L'ADC porta un contributo significativo sull'errore globale del sistema di misura. Per utilizzare un'elevata risoluzione e un più preciso ADC potrebbe essere un compito impegnativo per questa applicazione tenuto conto delle sue esigenze di consumo di potenza molto restrittive.

Di seguito viene riportata una tabella su quello che in qualche modo possiamo chiamare "fonti di incertezza" di questo avanzato sistema di misura in base ai componenti che lo costituiscono:

Component	In-phase [10^{-6}]	Quad. [10^{-6}]
CT1	5	3
CT2	10	10
I/V converter	20	20
ADC/DAC/PCC	80	70
RSS	83.2	73.6

RIEPILOGO

La progettazione di questo trasformatore di corrente a doppio stadio per le operazioni in alta tensione e' stato presentato in questo testo. L'isolamento dall'alta tensione si ottiene tramite l'utilizzo di fibre ottiche che vengono utilizzate sia per quanto riguarda il trasferimento di dati che il trasferimento di potenza. La sua precisione e' più di un ordine di grandezza migliore della classe 0.2 di un normale trasformatore di corrente ordinario. E' adatto ad essere impiegato come sensore di corrente nelle misurazioni di corrente in sistemi ad alta tensione per calibrazioni (*in-situ*) sul luogo dove e' situato l'impianto.

CONCLUSIONI

Dal punto di vista ingegneristico e' possibile tramite particolari metodi costruttivi visti e tramite un notevole risparmio sulla quantità di rame e ferro usato nel trasformatore ottenere risultati molto buoni e in alcuni casi anche migliori nell'accuratezza e nella precisione nella determinazione del valore della corrente misurata tramite un trasformatore di corrente a doppio stadio rispetto a un trasformatore di corrente ordinario, con ad esempio una diminuzione del costo globale del dispositivo.

I vantaggi sulla precisione della tecnica del doppio stadio abbiamo visto che diminuiscono se il carico esterno applicato aumenta di valore. Ha caratteristiche che si avvicinano molto a quelle di un trasformatore ideale quando lavora in condizioni di carico esterno pari a zero.

Studi teorici e sperimentali hanno illustrato che la sua linearità e in particolare la precisione potrebbero essere considerevolmente migliorati se le condizioni di carico esterno applicato sono ben note.

Bibliografia:

Misure elettriche di Giuseppe Zingales ed Cleup

Metodi e Strumenti, Giuseppe Zingales, ed UTET

Dispense di Misure Elettriche, A. Bossi, P. Malcovati

Dispense di Misure sui sistemi di potenza di Nicola Locci

H.B. Brooks and F.C. Holtz "*The two stage current transformer*" AIEE 1922.

J.L. West and P.N. Miljanic "*An improved two stage current transformer*"
IEEE 2006

IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers, IEEE Std.
C57.13, 1993.

P.N. Miljanic " *Current transformer with internal error compensation*" 1970

[9] W. J. M. Moore and P. N. Miljanic, "The current comparator," in *IEE
Electrical Measurement Series 4*. London, U.K.: Peregrinus, 1988.

T.M. Souders "*Wide band two stage current transformer of high accuracy*"
IEEE 1972

P.N. Miljanic and W.J.M. Moore "*An electronically enhanced magnetic core for
current transformer*"IEEE 1991

[4] J. G. Werthen, A. G. Andersson, S. T. Weiss, and H. O. Björklund,
"Current measurements using optical power," in *Proc. IEEE/PES Transmiss.
and Distrib. Conf.*, Los Angeles, CA, Sep. 1996, pp. 213–218.

[5] S. Weiss, J. Werthen, and A. Andersson, "Optically powered sensor
technology,"
in *Proc. ISA 98 Conf.*, Reno, NV, May 3–7, 1998, pp. 741–746.

[6] A. Andersson, D. Destefan, J. D. Ramboz, S. Weiss, and J. M. DeHaan, "Unique EHV current probe for calibration and monitoring," in *Proc. IEEE/PES Transmiss. and Distrib. Conf.*, Atlanta, GA, Nov. 2001, vol. 1, pp. 379–384.

[7] A. Andersson, D. Destefan, J. D. Ramboz, and S. Weiss, "Precision EHV current probe and comparator for field CT/OCT verification and line monitoring," in *Proc. 3rd EPRI Opt. Sens. Syst. Workshop*, Pittsburgh, PA, Oct. 2001, vol. 1, pp. 379–384.